

补偿收缩混凝土防裂机理研究

鲁 电

(中国水利水电第十二工程局施工科学研究所, 浙江 建德 311600)

摘要:为研究补偿收缩混凝土的应用效果和安全性,在进行大量试验研究的基础上,提出了补偿收缩混凝土动态控制理论和方法.在混凝土中加入一定量的VF防裂剂,能够使混凝土在膨胀时间及膨胀量上和其收缩曲线相吻合,以此来保证混凝土的体积变形过程始终满足其抗拉强度要求,达到混凝土防裂的目的.

关键词:补偿收缩混凝土;收缩裂缝;收缩应力;收缩应变;约束系数

中图分类号:TV755.7

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2003)04-0008-02

近几年来,随着我国混凝土施工技术水平的不断提高,补偿收缩混凝土技术在防止混凝土收缩裂缝方面的理论研究和工程应用越来越广泛地得到工程界的重视.工程实践证明,补偿收缩混凝土能够在防止混凝土收缩裂缝方面起到积极的作用.但是,如果对补偿收缩混凝土的特性缺乏足够的认识,盲目的使用就会产生许多负面影响,严重的还会导致混凝土结构破坏,造成重大损失.为了安全地应用补偿收缩混凝土,有效地防止混凝土收缩裂缝的发生,中国水利水电第十二工程局施工科学研究所在这方面做了大量的试验研究及工程应用实践工作,取得了可喜的研究成果.

1 混凝土收缩裂缝的发生原因

众所周知,一维线性混凝土结构发生收缩裂缝的主要原因是在外界和混凝土自身的因素影响下,混凝土收缩变形受到混凝土结构体内和周边约束时,在混凝土体内产生与收缩变形方向相反的分布收缩应力,当分布收缩应力沿一维结构长度方向累加在结构中横截面上形成的最大拉应力超过混凝土的抗拉强度时,混凝土开裂,长板收缩应力分布如图1所示.

板内的分布收缩应力可按式(1)计算:

$$\sigma_x(t) = E_c(t) K_r S(t) \epsilon_c(t) \quad (1)$$

式中: $\sigma_x(t)$ 为板内分布收缩应力,随时间和位置变化,在某一时间 $\sigma_x(t)$ 的最大值为 $\sigma_{x\max}(t)$ 发生在长板的中部,由 K_r 可知,随着板的长度加大 $\sigma_{x\max}(t)$ 也逐渐增大,说明收缩应力沿板长方向有累加作用; $E_c(t)$ 为混凝土的弹性模量,随时间变化; K_r 为约束系数, $K_r = 1 - \text{ch}\beta x / [\text{ch}\beta(L/2)]$, 随长板结构位置变化,

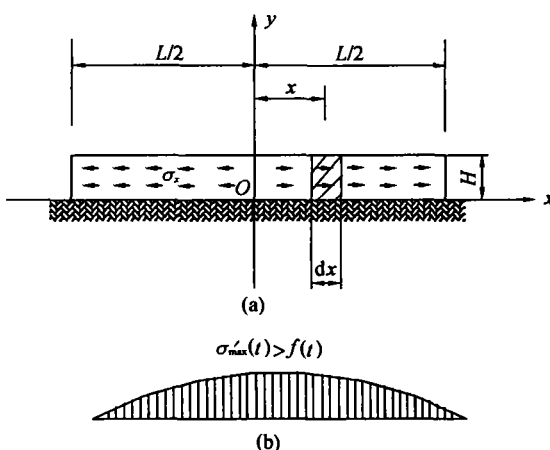


图1 收缩应力分布

当 $x=0$ 时 K_r 取最大值为 $K_{r\max} = 1 - 1/[\text{ch}\beta(L/2)]$, 当 $x=L/2$ 时 $K_r=0$, 其中 $\beta = \sqrt{C_x / (HE_c(t))}$, C_x 为阻力系数, H 为板厚度; $S(t)$ 为混凝土徐变松弛系数,随时间变化; $\epsilon_c(t)$ 为混凝土在外界和自身因素影响下的体积自由收缩应变,随时间变化.当某一时间 $\sigma_{x\max}(t)$ 大于混凝土抗拉强度时结构开裂,即

$$\sigma_{x\max}(t) > f(t) \quad (2)$$

式中: $f(t)$ 为混凝土极限抗拉强度,随时间变化.

由于收缩拉应力 $\sigma_x(t)$ 在结构中的分布是不均匀的, $\sigma_{x\max}(t)$ 发生在对称的一维线性结构的中间,一般收缩裂缝往往出现在结构的中部,所以通过提高混凝土强度的方式来达到防止收缩裂缝的目的是不经济的.

2 补偿收缩混凝土防裂机理

补偿收缩混凝土是利用在混凝土中添加具有膨

胀性能的外加剂使硬化后的混凝土产生与收缩相反的体积膨胀来补偿混凝土的收缩,以此消除或减小收缩应力,其关系如下:

$$\sigma_x(t) = E_c(t)K_r S(t)[\epsilon_c(t) - \epsilon_v(t)] \quad (3)$$

式中: $\epsilon_v(t)$ 为混凝土体积自由膨胀应变,随时间变化。

由式(3)可见, $\sigma_x(t)$ 随 $\epsilon_v(t)$ 增大而减小,当 $\epsilon_v(t)$ 大于 $\epsilon_c(t)$ 时, $\sigma_x(t)$ 还可以从收缩拉应力变为膨胀压应力,从而达到防止收缩裂缝的目的。但在收缩应力 $\sigma_x(t)$ 减小的同时,由于混凝土体内的膨胀源的作用,混凝土原生结构的每一微元点上都要受到均匀较小的膨胀拉应力,这种膨胀拉应力大小与膨胀量有关并且可以在远小于 $\sigma_{x\max}(t)$ 的范围内加以控制。由此可见,补偿收缩混凝土实际上就是将混凝土结构收缩拉应力峰值 $\sigma_{x\max}(t)$ 的能量均匀转化分摊到混凝土体积内的每一点上,使不均匀的收缩应力在混凝土结构内基本达到均匀。只要控制结构内每一点的膨胀应力值都小于混凝土抗拉强度,就能防止收缩裂缝的发生^[1]。因此,用补偿收缩混凝土来防止结构收缩裂缝是经济有效的方法。

3 补偿收缩混凝土安全性研究

试验研究表明,要使补偿收缩混凝土达到既能消除结构裂缝又能防止混凝土原生结构的局部胀裂破坏的目的,就必须注意混凝土膨胀量及膨胀时间的有效控制。一方面当一维线性结构的长度较大时,由于结构中较小的收缩应变 $\epsilon_c(t)$ 值就会在结构的中部产生较大的收缩应力峰值 $\sigma_{x\max}(t)$,从而就更容易产生结构中部的收缩裂缝。从式(3)中可知当混凝土在膨胀源的作用下产生体积膨胀,其膨胀量应大于或等于收缩应变且膨胀时间应和混凝土的收缩变形时间相适应才能起到消除收缩应力的最佳效果。另一方面由于膨胀源的体积膨胀作用,混凝土结构中每一微元体内都受到膨胀拉应力:

$$\sigma_v(t) = E_c(t)S(t)\epsilon_v(t) \quad (4)$$

式中: $\sigma_v(t)$ 为混凝土体内膨胀拉应力; $E_c(t)$ 为混凝土的弹性模量,假定拉、压相同; $\epsilon_v(t)$ 为混凝土自由膨胀应变。以上各量都是时间的函数,混凝土结构中均匀加入膨胀源后各微元体上同时受到收缩应力和膨胀拉应力的共同叠加作用,将微元体单独取出其力学模型如图2所示。

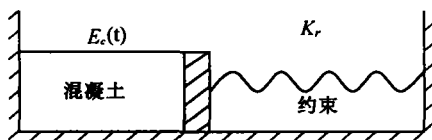


图2 微元体受力模型

微元体所受总应力表达式如下:

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_v(t) + \sigma_x(t) = E_c(t)S(t)\epsilon_v(t) + \\ &E_c(t)K_r S(t)(\epsilon_c(t) - \epsilon_v(t)) = \\ &E_c(t)S(t)[\epsilon_v(t) + K_r(\epsilon_c(t) - \epsilon_v(t))] \end{aligned} \quad (5)$$

从式(5)中可知当混凝土周边约束刚度较大时即约束系数 $K_r \rightarrow 1$, 此时微元体所受总应力可用式(6)表示:

$$\sigma = \sigma_v(t) + \sigma_x(t) \approx E_c(t)S(t)\epsilon_c(t) \text{ (拉)} \quad (6)$$

即总应力仅与混凝土自由收缩应变 $\epsilon_c(t)$ 有关,而与混凝土的自由膨胀应变值 $\epsilon_v(t)$ 无关,表明当周边约束较大时混凝土的自由膨胀应变值 $\epsilon_v(t)$ 可以相对地大一些,所以在工程中一般用于封堵或填槽的混凝土膨胀量可相对较大。

当混凝土周边约束很小时即在自由情况下约束系数 $K_r \rightarrow 0$, 此时微元体所受总应力可用式(7)表示:

$$\sigma = \sigma_v(t) + \sigma_x(t) \approx E_c(t)S(t)\epsilon_v(t) \text{ (拉)} \quad (7)$$

即总应力仅与混凝土膨胀应变值 $\epsilon_v(t)$ 有关,所以在小约束情况下为保证补偿收缩混凝土使用的安全性,对混凝土结构的膨胀应变有一定的限制要求,否则就容易造成混凝土的局部破坏。

通过以上的讨论可知,要确保补偿收缩混凝土在小约束条件下的应用有效性和安全性,其混凝土在硬化过程中任意时间的自由膨胀应变都必须满足下列关系式:

$$\epsilon_{v\min}(t) < \epsilon_v(t) < \epsilon_{v\max}(t) \quad (8)$$

式中: $\epsilon_{v\min}(t)$ 为满足补偿收缩要求所需的最小自由膨胀量, $\epsilon_{v\min}(t) = \epsilon_c(t) - \frac{f(t)}{E_c(t)K_r S(t)}$; $\epsilon_{v\max}(t)$ 为确保补偿收缩混凝土安全的最大自由膨胀应变变量, $\epsilon_{v\max}(t) = \frac{f(t)}{E_c(t)S(t)}$ 。公式中的各值都是时间的函数,可见 $\epsilon_{v\min}(t)$ 和 $\epsilon_{v\max}(t)$ 是两条随时间变化的曲线。

综上所述,为确保补偿收缩混凝土防裂效果和安全性,在工程应用之前必须通过试验研究确定其容许的最大和最小自由膨胀曲线,只要补偿收缩混凝土实际膨胀曲线在此范围内就能保证其防裂效果和安全性。

4 补偿收缩混凝土防裂效果分析

目前,应用补偿收缩理论防止混凝土收缩裂缝有两种不同的计算方法,这两种方法的区别在于考虑补偿收缩时间的不同。有些学者认为,补偿收缩混凝土是利用混凝土在约束条件下,由早期膨胀所产生的预压应力来补偿收缩,从而达到消除或减少裂缝的目的^[2]。另一些学者则认为,真正意义上的补偿收缩混凝土是经试验研究后,根据混凝土的收缩时间来设计混凝土膨胀时间,使混凝土(下转第17页)

生产用水和工业用水的影子价格计算模型.

$$PP = 4.1684 - 0.5902 \ln x_1 + 0.4061b \quad (15)$$

$$(3.2606) \quad (-2.8625) \quad (10.6190)$$

$$R^2 = 0.8990 \quad F = 58.9753$$

式中: PP 为省级以下行政区域生产用水影子价格;
 x_1 为农田亩均灌溉用水量; b 为用水量占水资源量的比例.

$$IP = 4.9430 - 0.8115 \ln x_2 + 0.8396b \quad (16)$$

$$(3.6879) \quad (-2.9152) \quad (10.7724)$$

$$R^2 = 0.9208 \quad F = 78.0000$$

式中: IP 为省级以下行政区域工业用水影子价格;
 x_2 为万元工业产值的用水量.

式(15)和式(16)需求的变量数据易于得到,计算简单,可信度较高,对于省级以下行政区域生产用水和工业用水管理决策的制定有参考价值.

6 结 语

本文依据 1999 年中国九大流域片水利投入占

用产出表,把投入产出和线性规划方法相结合,首次计算了 1999 年中国九大流域片生产用水和工业用水的影子价格.然后对计算结果进行了相关因素分析,发现用水量占水资源量的比例是决定生产用水和工业用水影子价格的主要因素,根据分析结果建立了两个非线性回归模型,降低了计算生产用水和工业用水影子价格的难度.在此基础上计算了全国各省生产用水和工业用水的影子价格,这对于各省制定合理水价,建立水市场有参考价值.最后给出了小于省级行政区划的生产用水和工业用水影子价格的计算模型,解决了计算生产用水和工业用水影子价格的基本问题.

参考文献:

- [1] 张屹山.影子价格的经济含义及其应用[J].吉林大学社会科学学报,1990,10(2):14~18.
- [2] 陈锡康.经济数学方法与模型[M].北京:中国财政经济出版社,1985.6~10.

(收稿日期:2002-12-25 编辑:张志琴)

(上接第 9 页)

在各种因素共同作用下,任一时间的体积变形控制在一定的范围内,从而使混凝土在凝结硬化过程中的收缩应力和膨胀应力得到有效的控制,由此来防止混凝土收缩裂缝的发生.经两种方法比较可知前者实际上是一种应力补偿,而后者才是真正意义上的收缩补偿.由于混凝土在硬化过程中其强度和弹性模量都是随时间变化而增大的函数,所以混凝土早期的膨胀量过大,容易造成混凝土早期胀裂破坏,尤其是在外界气温较低混凝土早期强度发展较慢时,这种现象就更容易发生.此外,由于混凝土早期弹性模量低能够储存在混凝土中的有效补偿应力十分有限,要达到一定的补偿收缩效果就必须加大混凝土的膨胀量,所以用应力补偿来消除收缩裂缝不是最理想的方法.工程实践证明,防止混凝土收缩裂缝比较安全、有效的方法是根据试验的结果确定混凝土在外界和自身因素作用下的收缩变形曲线,然后在混凝土中加入经过改性后的膨胀材料,使混凝土在膨胀时间和膨胀量上与其收缩曲线相吻合,以此来保证混凝土的凝结硬化过程中产生的收缩拉应力和各点的膨胀应力始终小于抗拉强度,从而达到混凝土安全防裂的目的.因此,混凝土的补偿收缩要求整个过程的变形控制.

5 结 语

中国水利水电第十二工程局施工科学研究所经

过多年的试验研究,根据上述补偿收缩混凝土理论已成功地开发了 VF 混凝土防裂剂,VF 防裂剂的特点是其膨胀量和膨胀时间能够根据防裂设计需要人为调节,重视混凝土体积变形和其强度协调发展的变化过程.上述补偿收缩混凝土理论已应用于十几座中、高面板堆石坝的混凝土面板防裂研究实践中,并都取得了理想的防裂效果.1999~2000 年,温州珊溪水库一期和二期面板混凝土防裂研究课题中应用了上述理论成果,经各方多次实地检查,在总面积为 7 万 m^2 的一期和二期面板上未发现任何裂缝,其中一期面板中最大长度达 142.6 m.经专家鉴定该项研究成果达到国际先进水平.2001 年,经中国企业联合会、中国企业家协会确认珊溪水库面板防裂技术创造了中国企业新纪录.一维混凝土结构收缩裂缝的理论研究和工程应用的成功,对今后预防二维板壳结构和三维大体积混凝土的温度收缩裂缝提供了宝贵的经验.

参考文献:

- [1] 鲁电.防止堆石坝面板混凝土收缩裂缝方法的研究[J].水利水电技术,2002,33(2):18~21.
- [2] 吴中伟.补偿收缩混凝土[M].北京:中国建筑工业出版社,1979.

(收稿日期:2002-10-17 编辑:张志琴)